

温州地区小杓鹬的代谢产热特征

胡奕 黄悦 姚雅棋 郑希羽 胡平霞 张春雨 郑蔚虹*

温州大学生命与环境科学学院 温州 325035

摘要: 动物能量代谢相关的生理生态特征与其地理分布密切相关。为探讨温州地区迁徙鸟类小杓鹬 (*Numenius minutus*) 的代谢产热特征及体温调节, 本文在环境温度 (T_a) 5.0 ~ 42.5 °C 范围内, 测定了小杓鹬的代谢率 (R_m , 以单位时间耗氧量表示, ml/h) 和体温, 并计算不同环境温度的热传导。结果显示: 在环境温度为 5 ~ 35 °C 的范围内, 小杓鹬的体温维持相对恒定, 平均体温为 (42.8 ± 0.10) °C; 热中性区为 27.5 ~ 40.0 °C; 在热中性区温度范围内, 代谢率即基础代谢率为 (221.31 ± 6.01) ml/h, 是体重预期值的 141%; 环境温度在 5.0 ~ 27.5 °C 范围内, 代谢率与环境温度 (T_a , °C) 呈负相关, 回归方程为 $R_m = 587.10 - 11.78 T_a$; 在 5.0 ~ 27.5 °C 的环境温度范围内, 小杓鹬的热传导最低, 平均为 (0.11 ± 0.00) ml/(g·h·°C), 是体重预期值的 212%; 代谢预期比和热传导预期比的比值 (F 值) 为 1.21, 表明该物种有较好的体温调节能力。小杓鹬具有较高的体温和基础代谢率, 较宽的热中性区, 具有北方地区小型鸟类的代谢特点, 而较高的下临界温度和热传导利于其在较温暖的地区越冬。

关键词: 小杓鹬; 基础代谢率; 环境温度; 热传导; 热中性区

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2023) 04-486-10

Metabolic Thermogenesis in Little Curlew *Numenius minutus* at Wenzhou Area

HU Yi HUANG Yue YAO Ya-Qi ZHENG Xi-Yu HU Ping-Xia
ZHANG Chun-Yu ZHENG Wei-Hong*

College of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China

Abstract: [Objectives] The physiological and ecological characteristics associated with the basal metabolic rate (R_{bm}) of birds correlate closely with their geographic distribution. In order to understand the ecophysiological characteristics of the Little Curlew *Numenius minutus* in the Wenzhou area, we measured their body temperature (T_b) and metabolic rate (R_m , metabolic rate was expressed as ml of O_2 consumed per h), and calculated their thermal conductance (C) at ambient temperature (T_a) from 5 to 42.5 °C. **[Methods]** Metabolic rate (ml/h) was estimated as the rate of oxygen consumption in an open-flow respirometry system (TSE, Germany). Basal metabolic rate was calculated for each individual as the average of 10 lowest

基金项目 国家自然科学基金项目 (No.31470472, 31971420);

* 通讯作者, E-mail: zwh@wzu.edu.cn;

第一作者介绍 胡奕, 女, 学士; 研究方向: 鸟类生理生态学; E-mail: 20211231207@stu.wzu.edu.cn.

收稿日期: 2022-06-13, 修回日期: 2023-05-10 DOI: 10.13859/j.cjz.202304002

consecutive oxygen consumption recordings (about 5 min) (Fig. 1). Thermal conductance [$\text{ml}/(\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$] was calculated at each temperature using the formula: $C = R_m/(T_b - T_a)$. F value was calculated as $F = (R_{bm}/\text{predicted } R_{bm})/(C/\text{predicted } C)$. All data were analyzed by SPSS (version 21.0). The effects of ambient temperature on body temperature, metabolic rate, and thermal conductance were analyzed using repeated measures ANOVA. The metabolic rates at different ambient temperatures were directly compared using independent sample t -test. Linear, or exponential, models were fitted where appropriate to describe the relationship between metabolic rate or thermal conductance and ambient temperature. All results were expressed as the mean $\pm$ SE, and $P < 0.05$ was taken to be statistically significant. **[Results]** There was no significant difference in initial body temperature over an ambient temperature range of 5 - 35 $^\circ\text{C}$, as Little Curlews could maintain their body temperature at 42.8 ± 0.1 $^\circ\text{C}$ (Fig. 2). There was, however, a significant variation in final body temperature over the same temperature range. The mean body temperature reached 43.7 $^\circ\text{C}$ when the ambient temperature was 42.5 $^\circ\text{C}$ (Fig. 2). The thermal neutral zone was 27.5 - 40.0 $^\circ\text{C}$, and the mean metabolic rate within the thermal neutral zone was 221.31 ± 6.01 ml/h, accounting for 141% of the expected value based on the bird's body mass (Fig. 3). Below the lower critical temperature, metabolic rate increased with declining ambient temperatures, and the relationship between metabolic rate and ambient temperature could be described as R_m (ml/h) = $587.10 - 11.78 T_a$ ($^\circ\text{C}$). At a 5 - 27.5 $^\circ\text{C}$ ambient temperature range, the thermal conductance was 0.11 ± 0.00 $\text{ml}/(\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, representing 212% of the expected value based on the bird's body mass (Table 1). However, the thermal conductance increased exponentially from 27.5 $^\circ\text{C}$ to 42.5 $^\circ\text{C}$ as described by the equation $\lg C [\text{ml}/(\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})] = 0.070 + 0.006 T_a$ (Fig. 4). The F value was 1.21. **[Conclusion]** The findings suggested that Little Curlews were able to adapt to the environment by implementing a relatively high level of basal metabolic rate, wider thermal neutral zone, high body temperature, and intensity of chemical thermoregulation. These properties would enable the birds to readily acclimate to their environments and survive in relatively cold areas.

Key words: *Numenius minutus*; Basal metabolic rate; Ambient temperature; Thermal conductance; Thermal neutral zone

代谢产热特征是衡量动物对环境适应和生存能力的重要指标,受到诸多环境因子的影响,其中温度是重要的因子之一 (McNab 2009, Zhou et al. 2016, Swanson et al. 2017, Cui et al. 2019)。基础代谢率 (basal metabolic rate, R_{bm}) 是指恒温动物在非繁殖期、清醒时且非活动状态下维持正常生理机能所需的最小能量支出,与动物的生理和行为特征有密切的联系 (McKechnie et al. 2004), 对其研究有助于人们理解动物对其生存环境的适应策略,因而受到生理生态学家和比较生理学家的广泛关注 (Zheng et al. 2008, Swanson et al. 2017)。热中性区 (thermal neutral zone) 是指恒温动物仅

仅依靠基础代谢所产生的热量就可以维持正常体温的环境温度范围 (Willmer et al. 2005), 其宽度可以作为动物对环境温度的适应指标。热传导 (thermal conductance, C) 是机体通过辐射、传导、对流和蒸发等方式散热的能力 (Aschoff 1981), 鸟类或哺乳动物可以通过增减羽或毛的质量改变隔热性, 从而影响热传导 (Schmidt-Nielsen 1997)。

早期的研究认为鸟类基础代谢率由遗传因子决定, 这体现了自然选择对基础代谢率的影响 (Hudson et al. 1996)。深入的研究发现鸟类基础代谢率与生活史特征、生理条件及生活环境等因素密切相关 (包括栖息地、气候、迁徙

及食物等)(Weathers 1979, Swanson et al. 1999, Brigham et al. 2006, McKechnie 2008, McNab 2009, 王虹铭等 2021)。例如,生活在寒冷环境中的鸟类有较高的基础代谢率,而生活在湿热和沙漠环境中的鸟类基础代谢率较低(Tieleman et al. 2002);长途迁徙鸟类的基础代谢率表现出较大的种内年变化,如基础代谢率在繁殖期相对较高,而在越冬期相对较低(Kvist et al. 2001, Zheng et al. 2013)。此外,鸟类食性也影响其代谢率(McNab 1988, Bozinovic et al. 2007),如以种子、浆果为食的黄眉鹀(*Emberiza chrysophrys*)和红胁绣眼鸟(*Zosterops erythropleurus*)具有较高基础代谢率;以昆虫为食的画眉(*Garrulax canorus*)和红嘴相思鸟(*Leiothrix lutea*)基础代谢率则相对较低(Liu et al. 2005)。这些研究结果表明,鸟类基础代谢率是具有较强可塑性的生理特征,可以反映鸟类对环境的适应模式和生存能力(McKechnie 2008, McNab 2009, Swanson et al. 2017)。

小杓鹀(*Numenius minutus*)属于鸻形目(Charadriiformes)鹀科(Scolopacidae),主要栖息于沿海附近的沼泽及湿地,以小鱼、小虾及昆虫幼虫为食(赵正阶 2001)。在蒙古国北部及俄罗斯西伯利亚等地繁殖,在印度尼西亚及澳大利亚北部越冬(MacKinnon et al. 2000)。小杓鹀在我国为候鸟,迁徙路径中包括内蒙古、吉林、黑龙江、浙江、福建和广东等地,在温州地区为旅鸟(郑光美 2017, 刘阳等 2021)。为了进一步认识迁徙性鸟类能量代谢的特点,了解小杓鹀的代谢产热特征,我们测定了不同环境温度条件下小杓鹀的体温和代谢率,以期研究不同生活史类型的鸟类代谢特征提供基础信息。

1 材料与方法

1.1 实验材料

2017 年 3 月春季迁徙期在浙江省温州市(27°29' N, 120°51' E)捕捉到 6 只雄性成体

小杓鹀,平均体重为(146.3 ± 3.3) g ($135.2 \sim 156.8$ g)。将小杓鹀标记后单笼($60\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 40\text{ cm}$)饲养于温州大学动物实验室,在自然光照下,室温平均为(20 ± 1) °C ($17 \sim 22$ °C)的环境条件下自由取食(小鱼及虾)和饮水,适应 1 周后,在 $5.0 \sim 42.5$ °C 范围内测定体温和代谢率等相关指标。

1.2 体温和代谢率的测定

体温(body temperature, T_b)采用便携式数字式温度计(Oakton, Eutech 公司,新加坡;精度 0.1 °C)测定。每次实验前后将温度计插入小杓鹀泄殖腔内约 2.0 cm 处,待温度计示数稳定后记录其值。

代谢率(metabolic rate, R_m)以单位时间耗氧量表示(ml/h)。耗氧量采用开放式氧气分析仪(Phenomaster, TSE 公司,德国)测定。小杓鹀放入体积为 3.6 L 的呼吸室内,实验前用硅胶和 NaOH 吸收呼吸室内的水分和 CO₂(林琳等 2010)。人工气候箱(BIC-300, 博迅公司,中国上海)控制实验温度,每个温度点偏差控制在 ± 0.5 °C 以内(王虹铭等 2021)。共设置 5、10、15、20、25、27.5、30、32.5、35、37.5、40 和 42.5 °C 的 12 组测定温度。每天 22:00 时至次日凌晨 4:00 时进行代谢率的测定。实验前将小杓鹀禁食 6 h,放入呼吸室内适应 1 h 后每隔 5 min 记录 1 次耗氧量,共测定 4 h(Wu et al. 2015)。选择 5 至 10 个连续、稳定的最低值计算代谢率(图 1)。

1.3 热传导的计算

按照牛顿冷却定律简化公式: $C = R_m / (T_b - T_a)$ (Aschoff 1981),计算每个温度点小杓鹀的热传导,式中, C 为热传导(minimum thermal conductance),单位为 ml/(g·h·°C), R_m 是代谢率,单位 ml/h, T_b 为体温(°C), T_a 是环境温度(ambient temperature)(°C)。

1.4 基础代谢率的体重预期值、热传导的体重预期值及 F 值的计算

根据 Aschoff 等(1970)的公式计算基础

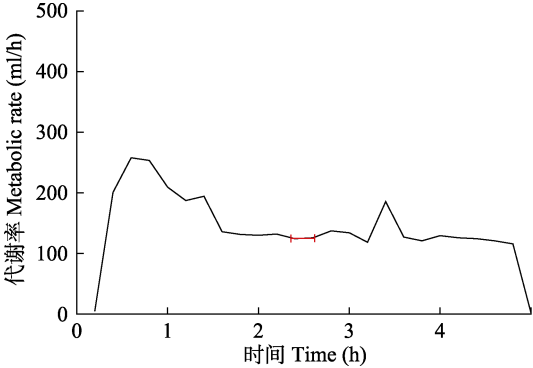


图 1 静息状态下小杓鹬耗氧量计算实例

Fig. 1 An example of oxygen consumption in Little Curlew *Numenius minutus* under resting conditions

图中标注的红色部分表示用于计算代谢率的 5 至 10 个稳定连续的数值。

Red line indicates 5 to 10 stable and continuous values used to calculate metabolic rate.

代谢率的体重预期值， $R_{bm} = 0.03177W^{0.726}$ ，式中， R_{bm} 为基础代谢率(J/h)， W 为体重(g)。热传导的体重预期值根据 Aschoff (1981) 的公式： $C = 0.947W^{-0.583}$ 进行计算，式中， C 为热传导[ml/(g·h·℃)]， W 为体重(g)。F 值的计算依照 McNab (1970) 的公式： $F = (R_{bm}/R_{bm\text{预期}}) / (C/C_{\text{预期}})$ ，式中， R_{bm} 和 C 分别为基础代谢率和热传导的实测值， $R_{bm\text{预期}}$ 和 $C_{\text{预期}}$ 分别是 Aschoff 等(1970)和 Aschoff(1981)给出的体重预期值。其中，F 值大于或接近 1.0 能反映出鸟类有较好的体温调节能力 (McNab 1970)。

1.5 统计分析

利用 SPSS(21.0 版本)统计软件包和 Origin (6.1 版本) 软件分别进行相关统计处理和绘图。不同温度测定组之间体温、代谢率和热传导的差异性用重复性测量方差分析 (repeated measure ANOVA)。两组之间代谢率的差异性采用独立样本 t 检验。通过比较各环境温度点的代谢率，得到代谢率值最低且各组之间无差异的环境温度范围，即热中性区。热中性区的最低环境温度为下临界温度 (lower critical

temperature)，最高环境温度为上临界温度 (upper critical temperature)。代谢率和热传导对环境温度做线性回归分析。文中数据以平均值 ± 标准误 (Mean ± SE) 表示， $P < 0.05$ 即认为差异显著。

2 结果

2.1 体温

实验前小杓鹬的体温基本维持恒定，平均为 $(42.7 \pm 0.1) ^\circ\text{C}$ ($39.5 \sim 43.8 ^\circ\text{C}$)。在实验温度 $5.0 \sim 42.5 ^\circ\text{C}$ 的范围内，小杓鹬的体温发生显著变化 ($F_{11,55} = 9.303$, $P < 0.001$) (图 2)。当环境温度为 $42.5 ^\circ\text{C}$ 时，其体温达到 $43.7 ^\circ\text{C}$ 。在热中性区内，小杓鹬的 F 值为 1.21。

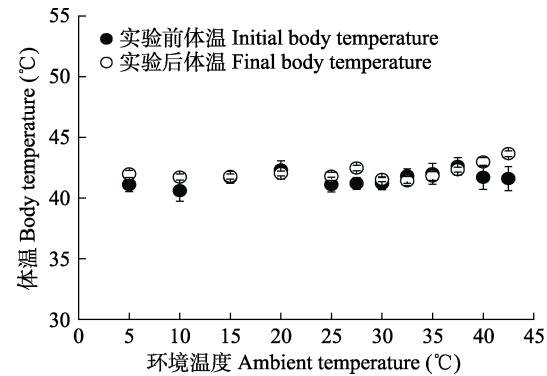


图 2 不同环境温度下小杓鹬体温的变化

Fig. 2 Changes of body temperature with ambient temperature in Little Curlew *Numenius minutus*

2.2 代谢率 (R_m) 和热中性区

在实验温度 $5.0 \sim 42.5 ^\circ\text{C}$ 的范围内，小杓鹬的代谢率发生显著变化 ($F_{11,55} = 43.919$, $P < 0.001$) (图 3)。在实验温度 $27.5 \sim 40.0 ^\circ\text{C}$ 范围内，各温度组间小杓鹬的代谢率无显著差异 ($P > 0.05$)，但显著低于环境温度为 $25.0 ^\circ\text{C}$ ($P < 0.05$) 和 $42.5 ^\circ\text{C}$ ($P < 0.05$) 时的代谢率， $27.5 \sim 40.0 ^\circ\text{C}$ 范围为小杓鹬的热中性区，其中， $27.5 ^\circ\text{C}$ 和 $40.0 ^\circ\text{C}$ 分别为其下临界温度和上临界温度。在此温度区内，小杓鹬的代谢率处于最低水平，其平均值为 $(221.31 \pm 6.01) \text{ ml/h}$ ，是体重预期

值的 141% (表 1)。在低于 27.5 °C 时, 代谢率随环境温度的降低而增加。在 5.0 ~ 27.5 °C, 代谢率 (R_m , ml/h) 与环境温度 (T_a , °C) 呈明显负相关, 回归方程为 $R_m = 587.10 - 11.78 T_a$ ($r = -0.874$, $P < 0.001$) (图 3)。

表 1 小杓鹬的能量学参数
Table 1 Parameters of energetics in Little Curlew *Numenius minutus*

能量学参数 Parameters of energetics	小杓鹬 <i>Numenius minutus</i>
样本数 Sample size	6
体重 Body mass (g)	146.3
体温 Body temperature (°C)	42.7
a	587.10
b	- 11.78
r	- 0.874
基础代谢率 Basal metabolic rate (ml/h)	221.31
基础代谢率体重预期比值 Expectation ratio of basal metabolic rate (%)	141
下临界温度 Lower critical temperature (°C)	27.5
上临界温度 Upper critical temperature (°C)	40.0
热传导 Thermal conductance [ml/(g·h·°C)]	0.11
热传导体重预期比值 Expectation ratio of thermal conductance (%)	212

r 指代谢率与环境温度回归的相关系数; 基础代谢率和热传导的体重预期比值分别依照 Aschoff 等 (1970) 和 Aschoff (1981) 公式计算。体重预期比值 = (实测值/预期值) $\times$ 100%。

r is correlation coefficient of regression between metabolic rates (R_m) and ambient temperatures (T_a): $R_m = a + b T_a$; Expectation ratio of basal metabolic rate and thermal conductance predicted by the appropriate equation of Aschoff et al. (1970) and Aschoff (1981), respectively. Expectation ratio (%) = (observed/predicted) $\times$ 100%.

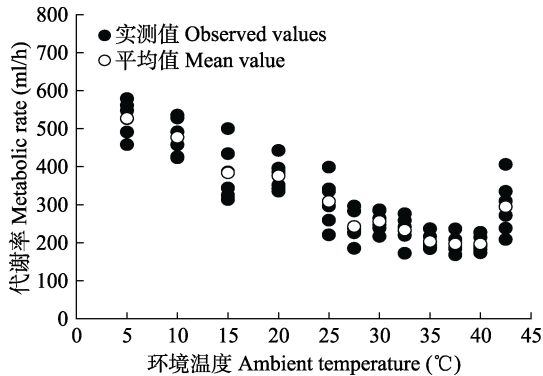


图 3 不同环境温度下小杓鹬代谢率的变化

Fig. 3 Changes of metabolic rate with ambient temperature in Little Curlew *Numenius minutus*

2.3 热传导 (C)

在实验温度 5.0 ~ 42.5 °C 的范围内, 小杓鹬的热传导发生明显变化 ($F_{11,55} = 20.862$, $P < 0.001$) (图 4)。小杓鹬在 5.0 ~ 27.5 °C 的热传导最低且维持相对稳定, 平均为 (0.11 $\pm$ 0.00) ml/(g·h·°C), 是体重预期值的 212% (表 1)。在实验温度 27.5 ~ 42.5 °C 的范围内, 热传导随环境温度的升高而升高, 其关系式为: $\lg C$ [ml/(g·h·°C)] = 0.070 + 0.006 T_a 。当环境温度升至 42.5 °C, 热传导达到 (2.09 $\pm$ 0.43) ml/(g·h·°C) (图 4)。

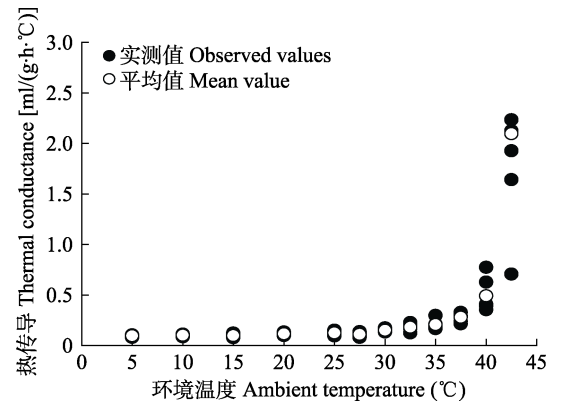


图 4 不同环境温度下小杓鹬热传导的变化

Fig. 4 Changes of thermal conductance with ambient temperature in Little Curlew *Numenius minutus*

3 讨论

3.1 基础代谢率和热中性区

基础代谢率是指动物维持细胞的完整性和稳定性所必需的最小能量支出, 是衡量生命活动的重要指标 (McKechnie 2008)。Rezende 等 (2002) 和 McNab (2009) 认为, 鸟类基础代谢率与气候特点密切相关。高纬度地区其环境温度较低, 迫使鸟类的气体交换及代谢面临巨大的挑战, 即鸟类维持自身能量的代价较高, 因而产热能力也相应维持在较高水平, 可见高水平的基础代谢率直接反映了鸟类对低温环境的适应 (柳劲松等 2004, 李铭等 2005, Swanson et al. 2017)。如生活在我国北方的棕

眉山岩鹀 (*Prunella montanella*), 其代谢率是体重预期值的 168% (柳劲松等 2004)。而生活在低纬度地区的鸟类基础代谢率往往相对较低。较低的基础代谢率可以防止体温过高, 有利于其逃避热压力 (Wikelski et al. 2003)。同时低纬度地区鸟类的低基础代谢率反映出较低的繁殖输出和较慢的生活史节奏 (slow pace of life) (Wiersma et al. 2007)。依据 Aschoff 等 (1970) 的公式, 我们总结了部分发表的有关寒温带和热带鸟类基础代谢率数据及体重预期比值 (表 2), 可以看出, 寒温带鸟类基础代谢率的体重预期比值普遍高于热带及亚热带鸟类。在对迁徙鸟类基础代谢率的研究中发现, 很多繁殖于北方而越冬于南方的鸟类, 其基础代谢率往往表现出地区差异, 即在繁殖地较高, 越冬地较低 (Kvist et al. 2001, Wiersma et al. 2007)。此外, 研究发现, 基础代谢率会发生与迁徙相关的季节性变化, 如黄腰林莺 (*Dendroica coronata*) 春季向北迁徙的过程中其整体基础代谢率较越冬地高出 31% (Swanson et al. 1999)。小杓鹬在我国为迁徙性鸟类, 本实验中小杓鹬的基础代谢率是体重预期值的 141%, 较高的基础代谢率可能与其春季迁徙有关。

在热中性区内, 代谢率与环境温度无关 (Schmidt-Nielsen 1997)。较低的下临界温度和较宽的热中性区是动物适应寒冷的典型特征。小杓鹬的热中性区为 27.5 ~ 40.0 °C, 热中性区较宽, 符合北方鸟类的特点。其下临界温度为 27.5 °C, 高于太平鸟 (*Bombycilla garrulous*) (18.0 °C) 和灰头鹀 (*Emberiza spodocephala*) (20.0 °C) (李铭等 2005)、鹁岩鹀 (*Prunella rubeculoides*) (22.2 °C) (邓合黎等 1990) 和北朱雀 (*Carpodacus roseu*) (22.5 °C) (Liu et al. 2004) 等北方鸟类, 但低于格尔丹雀 (*Erythrura gouldiae*) (31.7 °C) (Burton et al. 2003) 和戴胜百灵 (*Alaemon alaudipes*) (32.7 °C) (Tieleman et al. 2002) 等典型热带鸟类, 和白头鹎 (*Pycnonotus sinensis*) (26.6 °C) (Zhang et al. 2006) 及红头长尾山

雀 (*Aegithalos concinnus*) (28.8 °C) (Qiao et al. 2016) 相似。由于迁徙鸟类必须应对不断变化的外界环境 (繁殖地、中途停歇地及越冬地), 小杓鹬可能通过改变下临界温度和热中性区宽度适应不同的环境条件 (Kvist et al. 2001, Zheng et al. 2013, Swanson et al. 2017)。

3.2 体温和热传导

与哺乳动物相比鸟类具有较高的体温。Prinzinger 等 (1991) 在总结了 1 001 种不同状态下鸟类的体温基础上, 认为鸟类由于适应飞行生活方式具有相对较高的能量需求, 因而代谢率较高, 而高的体温是对高代谢率的生理适应结果。另外, 不同的鸟类类群其体温也表现出明显差异, 如鹈形目 (*Pelecaniformes*) 的平均体温为 38.3 °C, 雁形目 (*Anseriformes*) 为 39.0 °C, 鸡形目 (*Galliformes*) 为 38.9 °C, 鸨形目 (*Charadriiformes*) 为 38.5 °C (Prinzinger et al. 1991)。本实验中, 小杓鹬的平均体温为 (42.8 ± 0.10) °C, 相对较高, 是对生活在高纬度地区高代谢的生理适应性反应。相反, 低纬度地区 (热带地区) 鸟类的代谢率相对于高纬度地区鸟类低, 可以避免体温过高使其散热受到限制 (Wikelski et al. 2003)。鸟类体温的相对恒定, 取决于其产热 (代谢率) 和散热 (热传导) 的动态平衡 (Clarke et al. 2008)。代谢预期比值和热传导预期比值之比 (*F* 值) 可以反映鸟类的体温调节能力。小杓鹬在热中性区的 *F* 值为 1.21, 说明其有较好的体温调节能力。

按照 Aschoffs (1981) 的公式, 动物的热传导取决于其体温、代谢率和体重。小型鸟类的体表面积相对较大, 羽毛隔热性能具有局限性, 热量散失相对较多, 因此具有相对较高的热传导 (Schmidt-Nielsen 1997)。一般热带地区的鸟类有相对较高的热传导, 而北方高纬度地区鸟类的热传导则相对较低。本实验结果显示, 小杓鹬的热传导是 Aschoff (1981) 体重预期值的 212%, 高于分布于我国北方的小鹀 (*E. pusilla*) 和栗鹀 (*E. rutil*) (相应的体重预期比值分别为 138% 和 140%)、棕眉山岩鹀 (相

表 2 不同地带的鸟类基础代谢率实测值与预期值的比较

Table 2 Comparison of observed and predicted basal metabolic rates of birds in different habitats

物种 Species	体重 Body mass (g)	基础代谢率 Basal metabolic rate (ml/h)	预期比值 Expectation ratio (%)	参考文献 References
寒温带地区 Cold and temperate region				
黄眉鹀 <i>Emberiza chrysophrys</i>	15.9	58.04	128	Liu et al. 2005
红胁绣眼鸟 <i>Zosterops erythropleura</i>	9.2	43.15	230	
太平鸟 <i>Bombycilla garrulus</i>	64.9	151.22	110	李铭等 2005
灰头鹀 <i>E. spodocephala</i>	15.1	71.52	151	
北朱雀 <i>Carpodacus roseus</i>	22.5	96.75	118	Liu et al. 2004
燕雀 <i>Fringilla montifringilla</i>	18.0	75.42	135	
白腰朱顶雀 <i>Acanthis flammea</i>	11.6	51.62	191	
鹁岩鹀 <i>Prunella rubeculoides</i>	22.2	93.46	115	邓合黎等 1990
棕颈雪雀 <i>Montifringilla ruficollis</i>	22.8	84.82	101	
角百灵 <i>Eremophila alpestris</i>	31.1	121.91	85	
黄嘴朱顶雀 <i>A. flavirostris</i>	13.9	65.05	182	
栗鹀 <i>Emberiza rutila</i>	15.3	61.05	146	柳劲松等 2001a
小鹀 <i>E. pusilla</i>	11.3	47.35	181	
欧金鸫 <i>Pluvialis apricaria</i>	189.23	213.35	98.81	Gutiérrez et al. 2018
剑鸫 <i>Charadrius hiaticula</i>	56.10	95.02	106.12	
金眶鸫 <i>C. dubius</i>	40.86	75.30	105.79	
扇尾沙锥 <i>Gallinago gallinago</i>	95.15	129.08	98.34	
黑尾塍鹬 <i>Limosa limosa</i>	261.26	286.85	105.18	
鹤鹑 <i>Tringa erythropus</i>	137.9	163.15	95.01	
矶鹑 <i>Actitis hypoleucos</i>	46.55	84.26	107.72	
黑腹滨鹬 <i>Calidris alpina</i>	45.79	78.88	102.05	
流苏鹬 <i>Philomachus pugnax</i>	177.89	242.03	117.22	
北红尾鹀 <i>Phoenicurus aureoreus</i>	17.6	50.25	151	王虹铭等 2021
普通朱雀 <i>Carpodacus erythrinus</i>	24.2	101.88	109	柳劲松等 2001b
小杓鹀 <i>Numenius minutus</i>	146.3	221.31	141	本研究 This study
热带及亚热带地区 Tropical and subtropical region				
黄翅澳蜜鸟 <i>Phylidonyris novaehollandiae</i>	24.1	118.6	77	Yuni et al. 2005
八哥 <i>Acridotheres cristatellus</i>	117.7	125.33	60	林琳等 2010
红顶侏儒雀 <i>Pipra mentalis</i>	12.3	34.81	85	Bartholomew et al. 1983
金领侏儒雀 <i>Manacus vitellinus</i>	15.5	41.85	86	
环喉雀 <i>Amadina fasciata</i>	17.2	38.36	74	Marschall et al. 1991
爪哇禾雀 <i>Padda oryzivora</i>	25.4	55.12	80	
七彩文鸟 <i>Chloebia gouldiae</i>	15.5	38.36	80	
白颈长尾雉 <i>Syrnaticus ellioti</i>	388.25	788.15	86	骆鹰等 2011
黑颈长尾雉 <i>S. humiae</i>	398.83	542.41	77	
丝光椋鸟 <i>Sturnus sericeus</i>	64.9	160.64	90	Zhang et al. 2006
白头鹎 <i>Pycnonotus sinensis</i>	25.6	73.10	79	
画眉 <i>Garrulax canorus</i>	47.1	167.21	60	Liu et al. 2005
红嘴相思鸟 <i>Leiothrix lutea</i>	21.6	91.56	120	

应比值为 148%) (柳劲松等 2004), 以及太平鸟和灰头鸫(相应比值分别为 153%和 157%) (李铭等 2005), 低于分布在长江以南广大地区的红嘴相思鸟(*Leiothrix lutea*) (相应的体重预期比值为 243%) (Liu et al. 2005), 同画眉(*Garrulax canorus*) (相应比值为 215%) (Liu et al. 2005) 和白腰文鸟(*Lonchura striata*) (相应比值为 200%) (Qiao et al. 2016) 相似, 表明羽毛隔热性能相对较弱。在环境温度 27.5 °C 以上, 小杓鹬的热传导随环境温度的升高而显著增加, 表明热传导在鸟类热量平衡调节中的重要作用。此外, 本实验期间正是鸟类的春季换羽时期, Weathers (1997) 认为, 由于春季鸟类换羽, 使羽毛的隔热性能降低, 从而使热传导增加, 有利于夏季时的身体散热。

鸟类的迁徙是非常耗费能量的过程, 候鸟需要有高能量储备及高营养水平以满足生理需求, 从而促进个体代谢率随迁徙的进行而变化, 如: 红脚鹬(*Tringa totanus*) 的基础代谢率在春季迁徙中明显增加 (Scott et al. 1996)。要证明候鸟的能量代谢与迁徙之间的联系, 还需进一步扩大研究对象及种群, 比较春秋两季基础代谢率的差异, 并分析迁徙中机体内糖、蛋白和脂肪等能量利用是否是引起鸟类基础代谢率变化的原因等问题 (Swanson 2010)。但是无论候鸟基础代谢率在迁徙过程中及前后如何变化, 都表明了候鸟以调节能量代谢这一方式适应其迁徙飞翔的需要, 基础代谢率变化是其能量代谢调节的重要方式之一。

温州地区小杓鹬的热生物学特征: 较高的体温和基础代谢率, 较宽的热中性区, 符合北方鸟类的代谢特点; 较高的下临界温度和热传导, 属于南方鸟类的特征。作为候鸟, 小杓鹬兼具南、北方鸟类的特点, 这可能与其迁徙习性有关。小杓鹬通过调节产热(化学)和散热(物理)之间的平衡来维持体温的恒定, 表明其具有对不同自然环境的良好适应能力。了解鸟类应对不同环境条件的生理生态特征, 将有助于我们理解鸟类自身的地域性生存对策及其

适应意义。

参 考 文 献

- Aschoff J. 1981. Thermal conductance in mammals and birds: Its dependence on body size and circadian phase. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 69(4): 611–619.
- Aschoff J, Pohl H. 1970. Der ruheumsatz von vögeln als funktion der tageszeit und der körpergröße. *Journal of Ornithology*, 111(1): 38–47.
- Bartholomew G A, Vleck C M, Bucher T L. 1983. Energy metabolism and nocturnal hypothermia in two tropical passerine frugivores, *Manacus vitellinus* and *Pipra mentalis*. *Physiological Zoology*, 56(3): 370–379.
- Bozinovic F, Muñoz J L P, Cruz-Neto A P. 2007. Intraspecific variability in the basal metabolic rate: Testing the food habits hypothesis. *Physiology and Biochemical Zoology*, 80(4): 452–460.
- Brigham R M, Woods C P, Lane J E, et al. 2006. Ecological correlates of torpor use among five caprimulgiform birds. *Acta Zoologica Sinica*, 52(Suppl): 401–404.
- Burton C T, Weathers W W. 2003. Energetics and thermoregulation of the Gouldian Finch *Erythrura gouldiae*. *Emu*, 103(1): 1–10.
- Clarke A, Rothery P. 2008. Scaling of body temperature in mammals and birds. *Functional Ecology*, 22(1): 58–67.
- Cui D Q, Wang N, Ge J R, et al. 2019. The role of temperature as a driver of metabolic flexibility in the Red-billed Leiothrix (*Leiothrix lutea*). *Avian Research*, 10(4): 485–496.
- Gutiérrez J S, Abad-Gómez J M, Sánchez-Guzmán J M, et al. 2018. Avian BMR in marine and non-marine habitats: A test using shorebirds. *PLoS ONE*, 7(7): e42206.
- Hudson J W, Kimzey S L. 1966. Temperature regulation and metabolic rhythms in populations of the House Sparrow, *Passer domesticus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 17(1): 203–217.
- Kvist A, Lindström Å. 2001. Basal metabolic rate in migratory waders: Intra-individual, intraspecific, interspecific and seasonal variation. *Functional Ecology*, 15(4): 465–473.
- Liu J S, Wang D H, Wang Y, et al. 2004. Energetics and thermoregulation of the *Carpodacus roseus*, *Fringilla montifringilla* and *Acanthis*

- flammea*. *Acta Zoologica Sinica*, 50(3): 357–363.
- Liu J S, Wang D H, Sun R Y. 2005. Climatic adaptations in metabolism of four species of small birds in China. *Acta Zoologica Sinica*, 51(1): 24–30.
- MacKinnon J, Phillipps K. 2000. *A Field Guide to the Birds of China*. Oxford: Oxford University Press.
- Marschall U, Prinzinger R. 1991. Vergleichende ökophysiologie von fünf prachtfinkenarten (Estrildidae). *Journal of Ornithology*, 132(3): 319–323.
- McKechnie A E. 2008. Phenotypic flexibility in basal metabolic rate and the changing view of avian physiological diversity: A review. *Journal of Comparative Physiology B*, 178(3): 235–247.
- McKechnie A E, Wolf B O. 2004. The allometry of avian basal metabolic rate: Good predictions need good data. *Physiological and Biochemical Zoology*, 77(3): 502–521.
- McNab B K. 1970. Body weight and the energetics of temperature regulation. *Journal of Experimental Biology*, 53(2): 329–348.
- McNab B K. 1988. Food habits and the basal rate of metabolism in birds. *Oecologia*, 77(3): 343–349.
- McNab B K. 2009. Ecological factors affect the level and scaling of avian BMR. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 152(1): 22–45.
- Prinzinger R, Preßmar A, Schleucher E. 1991. Body temperature in Birds. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 99(5): 499–506.
- Qiao Q G, Liang H J, Bai M L, et al. 2016. Interspecific variation of thermoregulation between small migratory and resident passerines in Wenzhou. *Zoological Research*, 37(3): 167–175.
- Rezende E L, Swanson D L, Novoa F F, et al. 2002. Passerines versus nonpasserines: so far, no statistical differences in the scaling of avian energetics. *The Journal of Experimental Biology*, 205(1): 101–107.
- Schmidt-Nielsen K. 1997. *Animal Physiology: Adaptation and Environment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Scott I, Mitchell P I, Evans P R. 1996. How does variation in body composition affect the basal metabolic rate of birds? *Functional Ecology*, 10(3): 307–313.
- Swanson D L, Dean K L. 1999. Migration-induced variation in thermogenic capacity in migratory passerines. *Journal of Avian Biology*, 30(3): 245–254.
- Swanson D L. 2010. Seasonal metabolic variation in birds: functional and mechanistic correlates // Thompson C F. *Current Ornithology*. Vol 17. Berlin: Springer, 75–129.
- Swanson D L, McKechnie A E, Vézina F. 2017. How low can you go? An adaptive energetic framework for interpreting basal metabolic rate variation in endotherms. *Journal of Comparative Physiology B*, 187(8): 1039–1056.
- Tieleman B I, Williams J B, Buschur M E. 2002. Physiological adjustments to arid and mesic environments in larks (Alaudidae). *Physiological and Biochemical Zoology*, 75(3): 305–313.
- Weathers W W. 1979. Climatic adaptation in avian standard metabolic rate. *Oecologia*, 42(1): 81–89.
- Weathers W W. 1997. Energetics and thermoregulation by small passerines of the humid, lowland tropics. *The Auk*, 114(3): 341–353.
- Wiersma P, Muñoz-García A, Walker A, et al. 2007. Tropical birds have a slow pace of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(22): 9340–9345.
- Wikelski M, Spinney L, Schelsky W, et al. 2003. Slow pace of life in tropical sedentary birds: A common-garden experiment on four stonechat populations from different latitudes. *Proceedings of the Royal Society B*, 270(1531): 2383–2388.
- Willmer P, Stone G, Johnston I. 2005. *Environmental Physiology of Animals*. Oxford: Blackwell Publishing Company.
- Wu M X, Zhou L M, Zhao L D, et al. 2015. Seasonal variation in body mass, body temperature and thermogenesis in the Hwamei, *Garrulax canorus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 179: 113–119.
- Yuni L P E K, Rose R W. 2005. Metabolism of winter-acclimatized new Holland honeyeaters *Phylidonyris novaehollandiae* from Hobart, Tasmania. *Acta Zoologica Sinica*, 51(2): 338–343.
- Zhang Y P, Liu J S, Hu J X, et al. 2006. Metabolism and thermoregulation in two species of passerines from south-eastern China in summer. *Acta Zoologica Sinica*, 52(4): 641–647.
- Zheng W H, Li M, Liu J S, et al. 2008. Seasonal acclimatization of metabolism in Eurasian Tree Sparrows (*Passer montanus*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 151(4):

- 519–525.
- Zheng W H, Lin L, Liu J S, et al. 2013. Geographic variation in basal thermogenesis in little buntings: Relationship to cellular thermogenesis and thyroid hormone concentrations. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 164(3): 483–490.
- Zhou L M, Xia S S, Chen Q, et al. 2016. Phenotypic flexibility of thermogenesis in the Hwamei (*Garrulax canorus*): Responses to cold acclimation. *American Journal of Physiology: Regulatory*, 310(4): R330–R336.
- 邓合黎, 张晓爱. 1990. 高寒草甸几种雀形目鸟类的标准代谢 (SMR). *动物学报*, 36(4): 377–384.
- 李铭, 柳劲松, 韩宏磊, 等. 2005. 太平鸟和灰头鹀的代谢产热特征及体温调节. *动物学研究*, 26(3): 57–66.
- 林琳, 王丽华, 柳劲松. 2010. 八哥的代谢产热特征及体温调节. *动物学杂志*, 45(5): 47–53.
- 刘阳, 陈水华. 2021. 中国鸟类观察手册. 长沙: 湖南科学技术出版社.
- 柳劲松, 张智研, 马红, 等. 2001a. 小鹀和栗鹀静止代谢率的特征. *动物学报*, 47(3): 347–350.
- 柳劲松, 王岩, 李豁然. 2001b. 普通朱雀标准代谢率的初步研究. *动物学杂志*, 36(3): 16–19.
- 柳劲松, 陈明焕, 王英, 等. 2004. 棕眉山岩鹀的代谢产热特征的初步研究. *动物学研究*, 25(2): 117–121.
- 骆鹰, 庾太林, 黄乘明, 等. 2011. 笼养黑颈长尾雉和白颈长尾雉代谢产热特征及体温调节. *动物学研究*, 32(4): 396–402.
- 王虹铭, 王咏, 章熹妮, 等. 2021. 温州地区冬季北红尾鸲的代谢特征及体温调节. *生态学杂志*, 40(1): 155–162.
- 赵正阶. 2001. 中国鸟类志: 上卷 (非雀形目). 吉林: 吉林科学技术出版社.
- 郑光美. 2017. 中国鸟类分类与分布名录. 3 版. 北京: 科学出版社.

勘 误

对《动物学杂志》2022 年 57 卷 5 期第 775 至 781 页发表的论文《海南省首次发现光合软体动物绒毛海天牛》进行勘误。该文中 5 处总状蕨藻的学名“*Caulerpa racemose*”应更改为“*Caulerpa racemosa*”，分别位于：(1) 775 页中文摘要部分第 5 行；(2) 776 页第 1 行；(3) 778 页图 1a 英文图注；(4) 779 页图 3 英文图注第 2 行；(5) 779 页正文左栏第 6 行。此外，780 页图 4 中第 11 行，“*Elysia teucolegnote*”应更改为“*Elysia leucolegnote*”。本文作者对该错误给读者们带来的误解深表歉意。

作者：章可兰 李歆毓 余冬 万迎朗